

# КОМПЕНСАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

## ДАЛЬНИХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Технически работоспособными являются относительно короткие ЛЭП, пропускная способность которых ограничена.

Обеспечить заданные уровни пропускной способности, отличных от естественных, можно за счёт изменения параметров ЛЭП с помощью средств компенсации.

**Компенсированные линии** – такие линии, у которых средствами компенсации добиваются сокращения волновой длины или эквивалентной длины (при наличии сосредоточенной емкости).

Разделяют продольную и поперечную компенсацию. Под продольной компенсацией понимается изменение индуктивности линии, под поперечной - изменение её ёмкости.

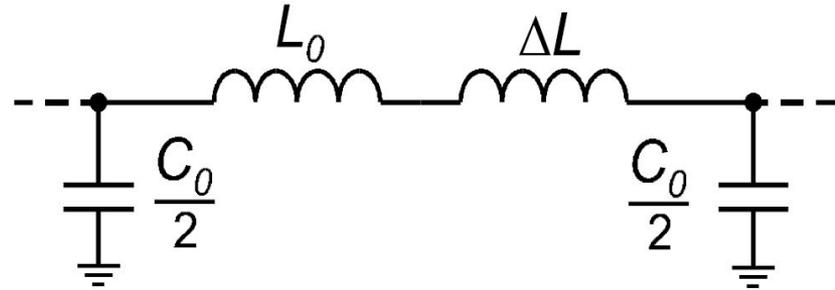
Индуктивной компенсацией называют компенсацию с помощью реакторов, ёмкостной - компенсацию с помощью конденсаторных батарей.

Рассмотрим **продольную компенсацию**, равномерно распределенную вдоль линии.

$$Z_{c,k} = \sqrt{\frac{L_0 + \Delta L}{C_0}} = \sqrt{\frac{(L_0 + \Delta L) \cdot L_0}{L_0 \cdot C_0}} = \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z_c \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}};$$

$$\lambda_{c,k} = \omega l \cdot \sqrt{(L_0 + \Delta L) \cdot C_0} = \omega l \cdot \sqrt{\frac{(L_0 + \Delta L) \cdot C_0 \cdot L_0}{L_0}} =$$

$$= \omega l \cdot \sqrt{C_0 \cdot L_0} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} = \lambda_{л} \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}};$$



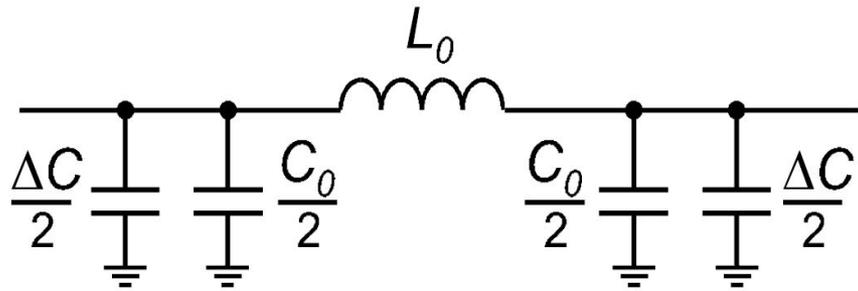
$$P_{c,k} = \frac{U_{ном}^2}{Z_{c,k}} = \frac{U_{ном}^2}{Z_c \cdot \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}} = \frac{P_c}{\sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}}}.$$

$\Delta L$  - удельная компенсационная добавка

$\Delta L > 0$  - индуктивная,

$\Delta L < 0$  - ёмкостная.

Рассмотрим **поперечную компенсацию**, равномерно распределенную вдоль линии.



$\boxtimes C > 0$  - ёмкостная компенсация;  
 $\boxtimes C < 0$  - индуктивная.

$$Z_{c,k} = \sqrt{\frac{L_0}{\Delta C + C_0}} = \sqrt{\frac{L_0 \cdot C_0}{(\Delta C + C_0) \cdot C_0}} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 + \frac{\boxtimes C}{C_0}}};$$

$$\lambda_{\text{эл},k} = \omega l \cdot \sqrt{(\Delta C + C_0) \cdot L_0} = \omega l \cdot \sqrt{\frac{(\Delta C + C_0) \cdot C_0 \cdot L_0}{C_0}} = \lambda \cdot \sqrt{1 + \frac{\boxtimes C}{C_0}};$$

$$P_{c,k} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_{c,k}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{Z_c} \cdot \sqrt{1 + \frac{\boxtimes C}{C_0}} = P_c \cdot \sqrt{1 + \frac{\boxtimes C}{C_0}}.$$

Относительные изменения волновых параметров линии при использовании продольной и поперечной компенсации.

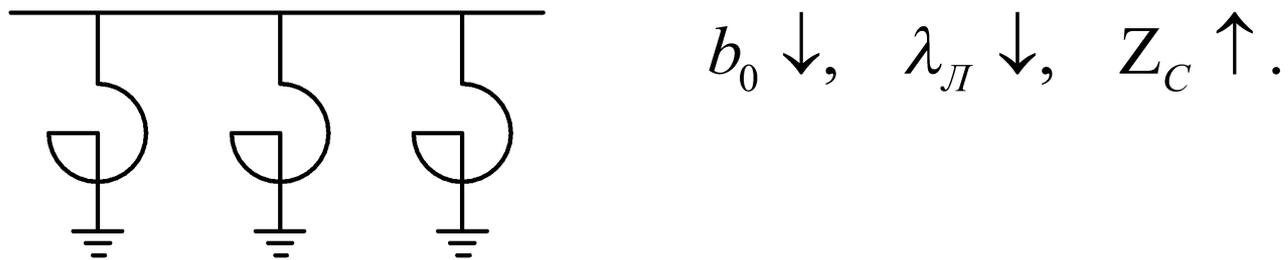
Компенсация			$Z_{c,k}/Z_c$	$\lambda_{c,k}/\lambda_l$	$P_{c,k}/P_l$
Продольная	Емкостная	$\frac{\Delta L}{L} < 0$	<1	<1	>1
	Индуктивная	$\frac{\Delta L}{L} > 0$	>1	>1	<1
Поперечная	Емкостная	$\frac{\Delta C}{C} > 0$	<1	>1	>1
	Индуктивная	$\frac{\Delta C}{C} < 0$	>1	<1	<1

## Основные схемы компенсации линий.

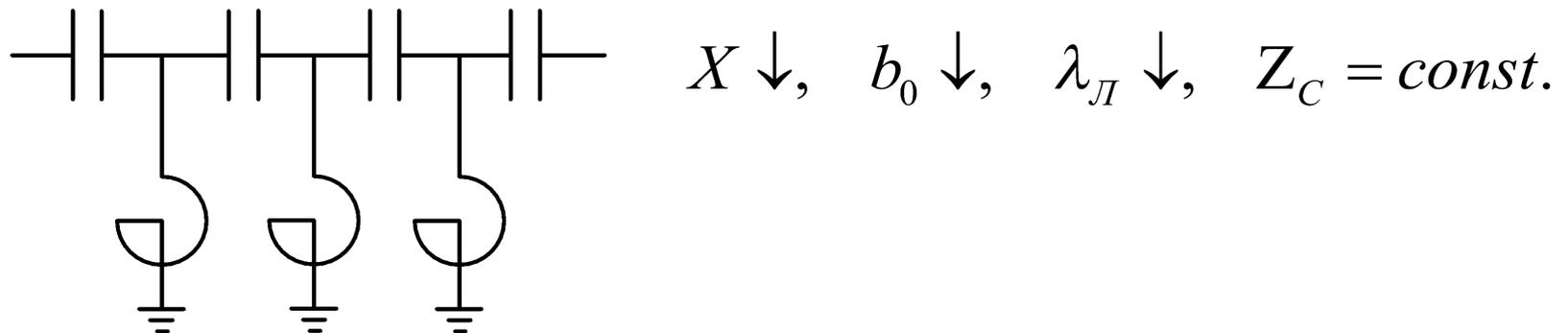
1. Продольная компенсация ёмкостью.



2. Поперечная компенсация индуктивностью.



3. Смешанная компенсация.



## Основные схемы настройки линий.

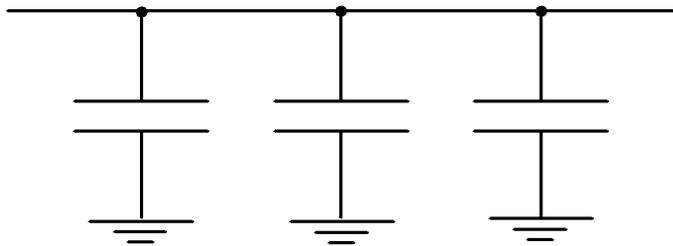
**Настроенные ЛЭП** – такие линии, у которых с помощью средств настройки достигается увеличение волновой длины.

1. Настройка продольной индуктивностью.



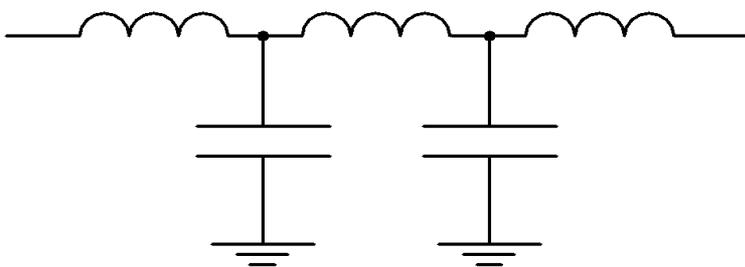
$$X \uparrow, \lambda_L \uparrow, Z_C \uparrow.$$

2. Настройка поперечной ёмкостью.



$$b_0 \downarrow, \lambda_L \uparrow, Z_C \downarrow.$$

3. Смешанная настройка.



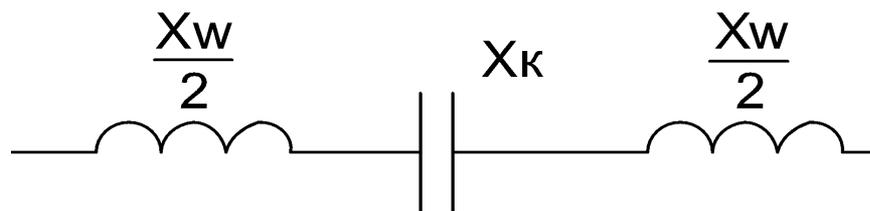
$$X \uparrow, b_0 \uparrow, \lambda_L \uparrow, Z_C = \text{const.}$$

## Линии с устройствами продольной компенсации (УПК).

Как показала эксплуатация, УПК являются надёжным и эффективным средством увеличения пропускной способности ЛЭП.

Место, количество и мощность УПК должны определяться с учётом следующих факторов:

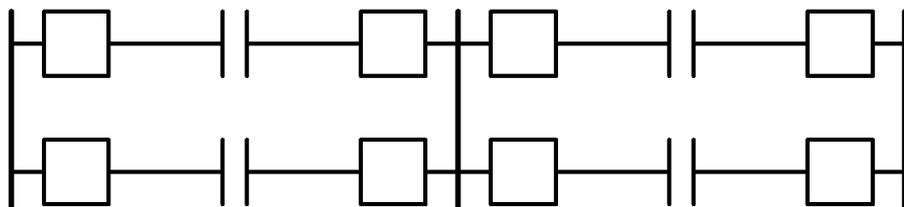
- устойчивость системы ;
- распределение напряжения вдоль линии и возможность его регулирования;
- наличие переключательных пунктов и подстанций;
- условие селективной работы релейной защиты.



$$K_c \approx \frac{X_k}{X_w} \leq 0,5$$

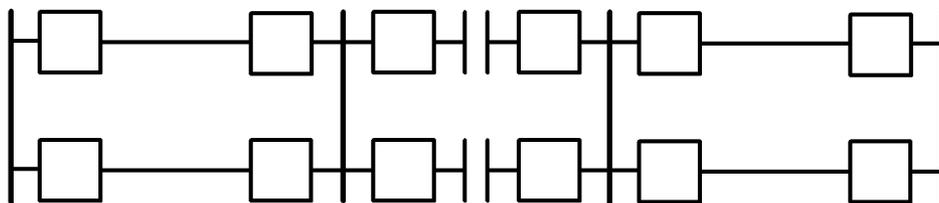
## Варианты включения УПК на параллельных линиях.

1. В серединах участков линий.



При отключении одного участка, ток в другом удваивается т.е. необходим запас мощности УПК.

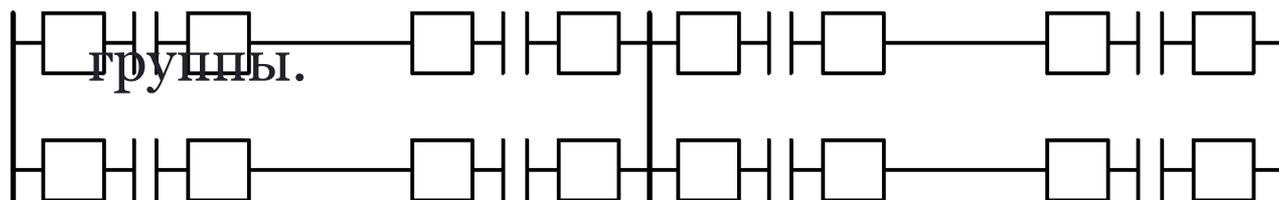
2. На стыках участков линий.



При отключении одного из участков, меняется степень компенсации.

3. Комбинация.

Наиболее гибкий и удобный. Конденсаторы разбиты на 2



Одновременно с увеличением пропускной способности при увеличении степени компенсации, возрастает и ток КЗ. Чтобы это предотвратить, стараются выполнить условие: ток короткого замыкания после УПК должен иметь индуктивный характер. Поэтому при установке УПК в середине ЛЭП принимают

$$K_C \leq 0,5.$$

Следует отметить, что эффект от УПК зависит и от того, где установка расположена на линии. Расчёты показывают, что учёт сопротивлений трансформаторов и генераторов требует приближение УПК к началу линии.

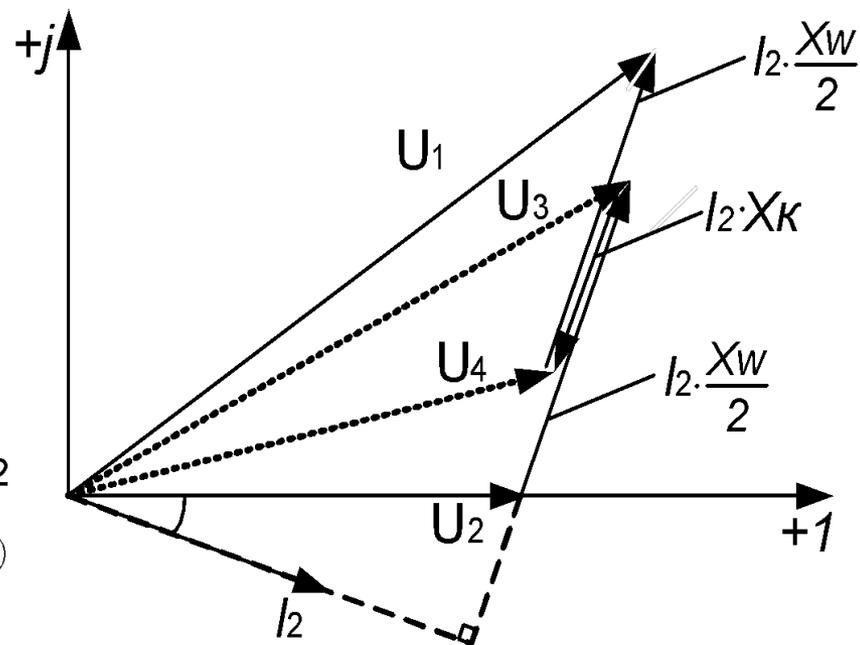
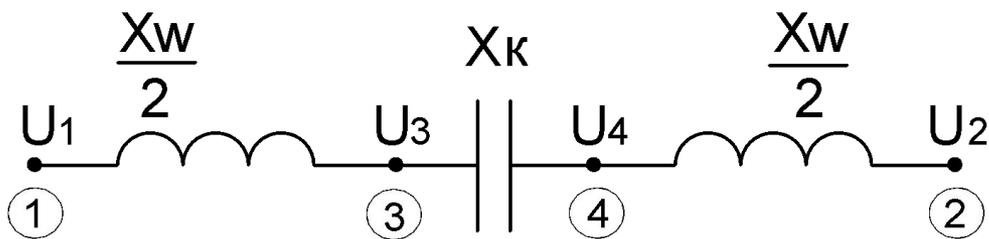
Факторы, ограничивающие компенсацию при включении УПК в середине линии.

- степень компенсации выбирается из условий устойчивости системы;
- при наличии УПК увеличиваются потери, т.е. КПД линии падает;
- применение УПК на линии в ряде случаев может привести к самовозбуждению и самораскачиванию синхронных машин;
- степень компенсации может ограничиваться условиями работы релейной защиты.

Наибольший эффект от установки УПК получается в том случае, когда напряжение до батареи равно напряжению после неё. Это может быть достигнуто, когда реактивная мощность до и после УПК будут иметь равные значения и противоположные направления.

УПК должны быть расположены в точке потокораздела реактивной мощности т.е. в серединах и на стыках участков линий.

Векторная диаграмма линии с УПК середине линии, при степени компенсации  $K_c=0,25$  и активно-индуктивном характере тока.



## Определение параметров УПК.

Рассмотрим расположение УПК на одной из промежуточных подстанций.

УПК собирают из отдельных конденсаторов, параметры которых известны.

Если принять, что номинальные ток и напряжение батареи равны току и номинальному напряжению электропередачи, то

$$m = \frac{I_{\text{номУПК}}}{I_{\text{номК}}} \quad - \quad \text{число параллельно соединённых элементов};$$
$$n = \frac{U_{\text{номУПК}}}{U_{\text{номК}}} \quad - \quad \text{число последовательно соединённых элементов}.$$

Ёмкость и мощность батареи определяются соединением конденсаторов:

$$X_K = X_{\text{УПК}} = \frac{X_C \cdot n}{m}, \quad \text{где } X_C \text{ и } Q_C \text{ – ёмкостное сопротивление и мощность одного конденсатора.}$$
$$Q_{\text{номУПК}} = 3 \cdot m \cdot n \cdot Q_C$$

Выбор степени компенсации производится с учётом факторов:

- минимум затрат;
- обеспечение требуемой пропускной способности.

Согласно ПУЭ, должно быть обеспечено 20% запаса по устойчивости.

$$P_{ЛЭП} = 1,2 \cdot P_{ЭЛ.СТ}$$

Учитывая, что

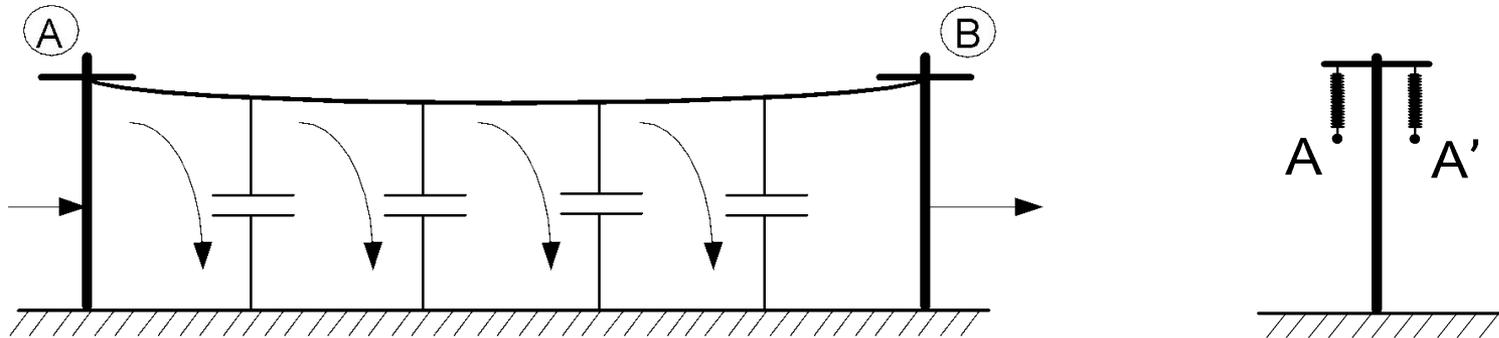
$$P_{ПП} = \frac{U_1 \cdot U_2}{Z_{\Omega} \cdot \sin \lambda}$$

можно найти необходимое значение  $\lambda_L$ :

$$P_{\max} = \frac{P_C}{\sin \lambda_L} \rightarrow \sin \lambda_L = \frac{P_C}{P_{ЛЭП}} \rightarrow \lambda_{\text{необх}} = \arcsin \frac{P_C}{P_{ЛЭП}}$$

## Разомкнутые линии

**Разомкнутая линия** – такая двухцепная линия, у которой провода одноименных фаз расположены на одной опоре.



Разомкнутые ЛЭП используют естественное ёмкостное сопротивление для компенсации индуктивного сопротивления линии. Первый провод присоединяется только к п/ст А, а второй – только к В. При некоторой длине линии ёмкость проводов полностью компенсирует индуктивное сопротивление линии.

Разомкнутые ЛЭП работают в условиях, близких резонансу токов.

Для выравнивания плотности тока необходимо изменять сечение, оно будет больше у головного участка и меньше к концу линии.

## Достоинства разомкнутых линий:

- не требуется компенсирующих устройств;
- КПД такой линии достаточно велико, 90-92%.

## Недостатки:

- высокая стоимость при небольшой передаваемой мощности;
- более сложная конструкция за счет крепления на одной опоре проводов разных фаз;
- неравномерность распределения тока вдоль линии;
- повышение напряжения на разомкнутом конце линии, для ограничения которого следует применять реакторы.